

氏名	ERIC AUGUSTUS JACINTO TINGATINGA
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)
学位記号番号	博理工甲第 694 号
学位授与年月日	平成 20 年 9 月 19 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Gravity Effects on Earthquake Response of Analytical Building Models (建物解析モデルの地震応答に及ぼす重力の影響)
論文審査委員	委員長 教授 川上 英二 委員 教授 岩下 和義 委員 教授 睦好 宏史 委員 准教授 齊藤 正人

論文の内容の要旨

It is an established fact in earthquake engineering that gravity is very important when structures, subjected to strong ground motions, undergo large displacements. When yielding occurs, gravity becomes the dominant force in causing the structure to collapse.

This thesis investigates the effects of gravity on the dynamic response of structures subjected to strong ground motions. A nonlinear rigid body-spring method (RBSM) is presented and used to show how gravity causes structures to collapse when subjected to a three-dimensional seismic wave. It is concluded that the proposed method is capable of demonstrating various collapse behavior of typical wooden houses in Japan during the 1995 Kobe earthquake. Results in the form of computer animations provide real-time assessment of structural integrity and a way to identify the weak points of a structure. Attempts to reinforce wooden houses show that the method is an innovative strategy for retrofitting.

Analytical building models which illustrate non-linear effects caused by gravity are also presented. Governing equations for the motion of flexure building and shear-flexural building subjected to lateral loads and earthquake-induced ground motions are developed to take into account large displacements. Numerical time-stepping methods are proposed to solve the equations and analytical solutions are formulated to obtain the response subject to small displacement approximations. With emphasis on elastic structures exhibiting geometric nonlinearity, the natural frequencies of the building models are compared with their corresponding models ignoring gravity, and frequency response curves are drawn to show how ground motion amplitude affects the apparent natural frequency.

Numerical examples of the response of typical flexure buildings show that while small displacement approximations predicts that gravity decreases the natural frequency of single-degree-of-freedom (SDOF) elastic systems, exact solutions show that apparent natural frequency increases with ground motion amplitude. The difference in the natural frequencies and responses of multi-degree-of-freedom (MDOF) flexure building and the equivalent shear building is not only due to gravity but is also due to the geometry of the structure.

This study also investigates a more realistic representation of a building using a shear-flexural building which can demonstrate the coupled effects of shear and flexural rigidity on the response. It is concluded that an elastic SDOF shear-flexural building subjected to large amplitude harmonic ground motion exhibits motion containing sub-harmonic components and increasing the amount of damping significantly decreases the higher mode contribution on the response. Exact solution shows that the apparent natural frequency decreases with the increase in ground motion amplitude.

論文の審査結果の要旨

大地震による人命被害の主な原因は、建物崩壊と火災延焼である。実際、1995年の阪神大震災では、6000名以上の人命が失われた。その第一の理由は地震により家屋が倒壊したためであり、その後、建物の耐震性向上の必要性が繰り返し指摘された。しかし、阪神大震災での教訓にも拘らず既存建物の耐震化は殆んど進んでいない。

論文申請者は、この主な理由を、地震時に建物が具体的にどのように壊れるかが想像できない、従って、どこをどう補強すれば良いかが判らない、全てを補強するなら建替えた方が経済的である、ためであると考えている。そして、地震時に具体的にどのように壊れるかを動画（アニメーション）で示し、どこを補強すべきであるか、設計変更すべきであることを明らかに示し、補強箇所を2、3箇所に限定した経済的な補強、設計変更を提案することを可能にすれば、建物の耐震化が飛躍的に進むものと考えている。そして、新しい解析方法として「地震応答崩壊解析方法」の計算プログラム開発した。

従来、建物の地震応答解析は微小な変位での理論に基づくものが大部分であり、大変形、更には、崩壊までを解析した例はほとんどない。しかも、比較的安価な木造住宅においては、複雑な計算を行うこと自体が稀である。しかし、近年の計算機の発達は著しく、優れた計算プログラムシステムを開発すれば、精度が良い地震応答解析方法が可能である。

論文申請者が第2章で提案している「地震応答崩壊解析方法」は、新しい解析方法であり、本方法では、まず建物を構成する柱・梁・壁など各部材の強さを実験結果に基づいて正確にモデル化する。次に、これらの部材を組み上げることにより、建物全体のモデルを作成している。これに大地震で観測された地震動を与えることにより、建物がどのように応答・崩壊するかを力学的に精密に計算している。阪神大震災で観測された地震動などを建物に与え応答を計算し、どのように安全であるか、または崩壊するかを動画で可視化している。

提案方法は従来の方法と比較して下記の特徴を有している。

従来の耐震設計法や耐震診断法は静的解析であり、破壊・崩壊・振動を直接扱っていないのに対し、本方法では、動的な非線形崩壊解析を行うことにより、方法の精度を向上させている。また、従来の方法は安全性を考えた設計・診断であり、「この外力では少なくとも破壊しない」という論理を使用しているため、「破壊する外力」が判らない。一方、本方法では、実際の現象をなるべく正確に表すことを目的としている。つまり、建物の各部材の強度としては下限値ではなく平均値を使用し、発生し得る様々な大きさの外力に対して平均的な（最も起こりそうな）応答を算定している。更に、本方法では、地震時において各部材の強度の余裕がばらついていることを利用している。すなわち、建物の破壊はすべての部材が同時に破壊して生ずる訳ではなく、1番の弱点箇所から始まり、全体の崩壊に進行している。従って、建物内の少数箇所の弱点を補強しておけば、建物全体として非常に強くなる可能性が高い。

また、従来の方法では、判定結果が数値の羅列として表されてきたのに対し、本方法では、動画（アニメーション）で判定結果を表す。動画で最初に壊れた部材（場所）が建物の弱点であり、どの部分が弱いかが視覚的にわかることから、家全体を耐震補強するのではなく、弱い部分だけを補強すれば良いことになる。従って、不必要な補強や過剰設計を避けることが可能であり、費用が安くすむ。改修後の応答も動画で確認できるため、家を新築・改築する際の設計のチェックや設計変更役に役立つと考えられる。

上述の第2章の解析では、構造物が地震時に大変形することを考慮しており、その際、動的応答に及ぼす重力の影響が重要であることを示している。即ち、構造物の大変形に伴う幾何学的非線形性と、材料の降伏

や破壊に伴う材料非線形性を考慮して、三次元の動的応答解析を行っているが、本解析が小変位の場合の解析と大きく異なる点の1つは、重力の影響である。この結論を受けて、本論文の後半では、構造物の代表的なモデルの地震応答に及ぼす重力の影響を、解析的に検討している。

第3章では、建物のモデルとしてよく使われている1自由度および多自由度のせん断変形モデルと曲げ変形モデルに対して、重力が応答に及ぼす非線形な影響を解析的に検討している。重力の影響の程度を表す無次元パラメータを定義し、このパラメータ、外力の大きさ、応答振幅が、モデルの固有振動数、固有モードに及ぼす影響を明らかにしている。

第4章では、せん断変形と曲げ変形との両方が生じる1自由度および多自由度のせん断曲げ変形モデルに対して、重力が応答に及ぼす非線形な影響を解析的に検討している。まず、各層のせん断変形量と回転変形量を未知数とする厳密な微分方程式を作成している。そして、数値厳密解を求め、これと微小変位の近似による解析解やその数値解と比較している。その際の数値厳密解の算定に際して、連立微分方程式の質量マトリクスがせん断変形量が零の場合には正則にならず逆行列が求まらないことを指摘し、数値解法を工夫して数値厳密解を算定している。

研究内容の公表状況に関しては、第一著者として International Journal の論文1篇が公表済 (Tingatinga, E., Kawakami, H. and Shrestha, S. M., Three-dimensional Seismic Collapse Analysis of Wooden Houses Using Rigid Body-Spring Method, The Open Construction and Building Technology Journal, 2008, Vol. 2, pp.116-123) であり、査読中の論文が1篇、投稿準備中の論文が1篇ある。また、共著者の論文としては International Journal の論文が1篇、全文査読の国際会議を伴う論文が3編公表済みである。

以上のように、本論文では、建物が強震動を受ける際の動的応答を崩壊挙動に至るまで解析する方法を展開し、地震応答に及ぼす重力の影響を検討している。その際、大変形に伴う幾何学的非線形性と、材料の降伏や破壊に伴う材料非線形性を考慮している。そして、有用な方法を開発し、有用な知見を得ている。よって、本学位論文審査委員会は、本論文を博士(学術)の学位論文として価値あるものと認め、合格と判定した。